



7º ENCUENTRO RedBioLAC
Facultad de Ciencias, Universidad de Chile
9 – 13 noviembre 2015

CURSO INTRODUCTORIO

Biogás y Biodigestores de pequeña y mediana escala

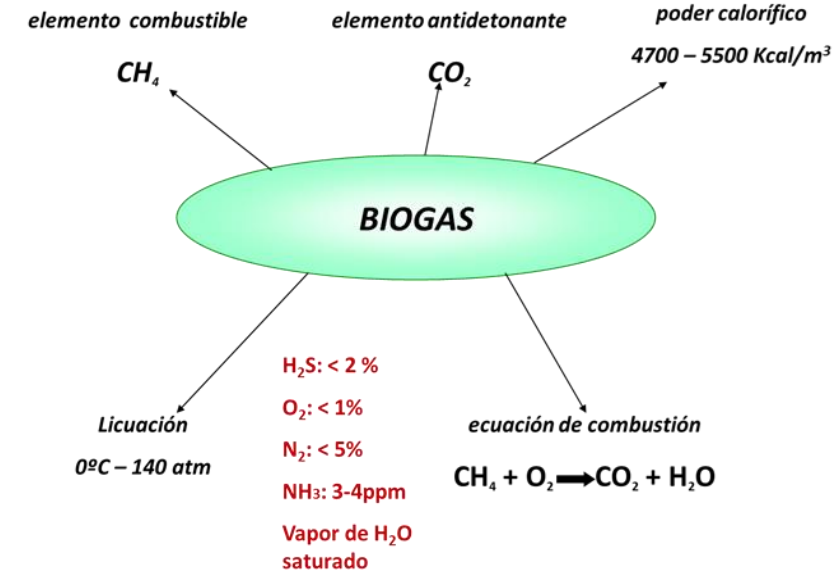
*Monitoreo y análisis instrumental / laboratorio para
evaluar la digestión anaeróbica*

***Biodigestión anaeróbica
Residuos orgánicos***

***Metabolismo
Microbiano***

Biogás

Digestato



***CRITERIOS PARA EVALUACIÓN GLOBAL DE
RESIDUOS BIOPROCESADOS (DIGESTATO):***

ACONDICIONADOR

***RESTITUCIÓN DE LA MATERIA
ORGÁNICA ESTABLE O HUMUS***

BIOFERTILIZANTE

***APORTE DE MINERALES: N-P-K,
OTROS***

Naturaleza de las materias primas usadas en el biodigestor.

Pueden ser residuos de origen animal, vegetal, humano, agroindustrial, forestal y otros.

Residuos de origen animal	: estiércol, orina, guano, camas, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescados.
----------------------------------	--

Residuos de origen vegetal	: malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado.
-----------------------------------	--

Residuos de origen humano	: heces, basura, orina.
----------------------------------	--------------------------------

Residuos agroindustriales	: salvado de arroz, orujos, cosetas, melazas, residuos de semillas.
----------------------------------	--

Residuos forestales	: hojas, vástagos, ramas y cortezas.
----------------------------	---

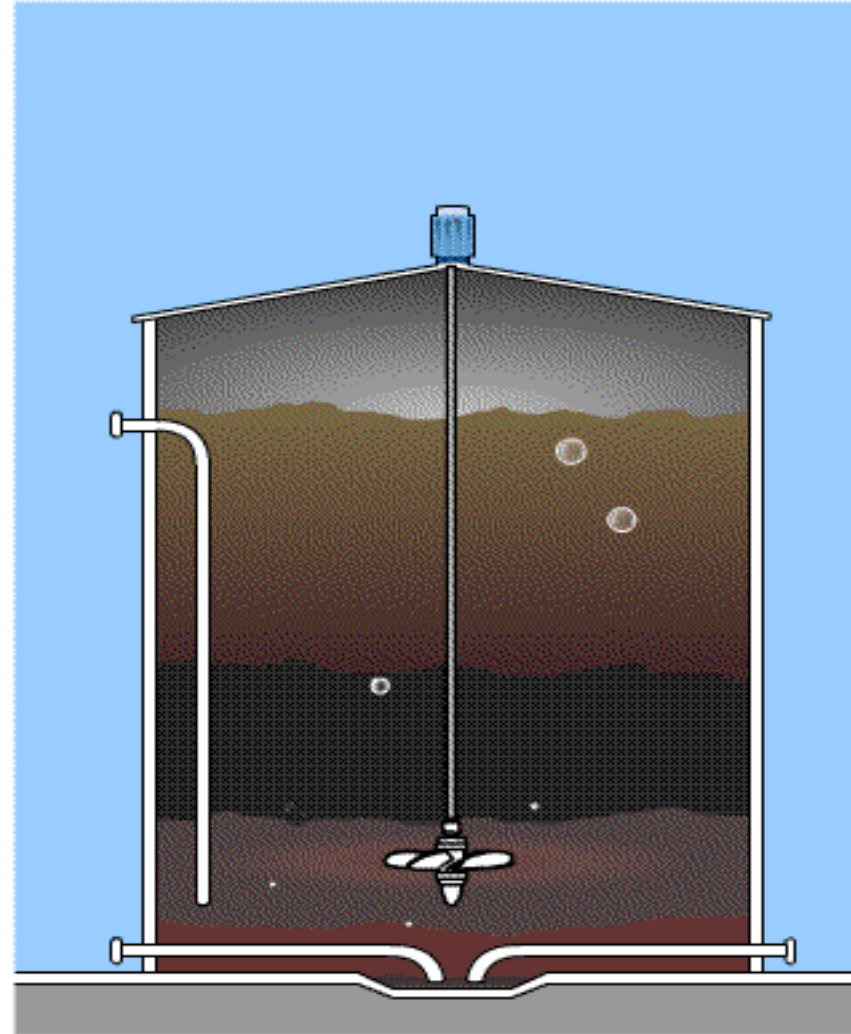
Residuos de cultivos acuáticos	: algas marinas, jacintos y malezas acuáticas.
---------------------------------------	---

Cuadro 1. Clasificación de sustratos para la Digestión Anaeróbica

Características	Clase	Tipo de Sustrato	Características Cuantitativas	
Sólido	1	Basura Doméstica	> 20 % ST 40-70 % Fracción Orgánica	Digestores tipo Batch
		Estiércol Sólido		
		Restos de Cosecha		
Lodo altamente contaminado, alta viscosidad	2	Heces Animales	100-150 g/l DQO 5%-10% ST 4%-8% SV	Digestores mezcla completa de operación continua
Fluidos con alto contenido de sólidos suspendidos (SS)	3	Heces Animales de cría y levante diluido con agua de lavado	3-17 g/l DQO 1-2 g/l SS	Digestores de alta eficiencia: filtros anaeróbicos
		Aguas residuales de mataderos		
Fluidos muy contaminados, sólidos en suspensión	4	Aguas residuales de agroindustrias	5-18 g/l DQO	
		Aguas Negras	4-500 g/l DQO	

PRINCIPALES FACTORES QUE CONDICIONAN EL PROCESO DE FERMENTACIÓN METANOGENICA:

- ***ANAEROBIOSIS***
- ***TEMPERATURA***
- ***TIEMPO DE RETENCIÓN***
- ***NIVEL SÓLIDOS TOTALES***
- ***RELACION C/N***
- ***pH***



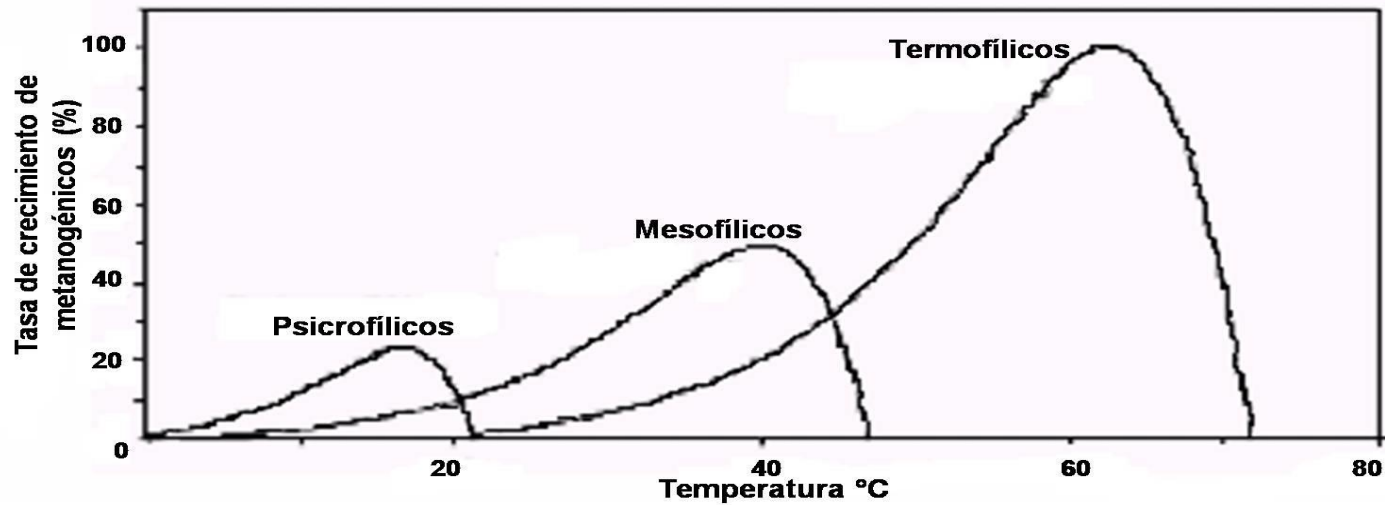
Factores

TEMPERATURA

La fermentación anaeróbica se efectúa entre 15 y 60°C.

Los microorganismos metanogénicos son muy sensibles a los cambios de temperatura; un cambio brusco por sobre 3°C afectará la producción de biogás, por lo tanto se debe asegurar la estabilidad de la temperatura.

Para el desarrollo óptimo del proceso, se distinguen dos rangos de temperatura: el mesófilo de 25 – 40°C y el termófilo de 50 – 60°C.

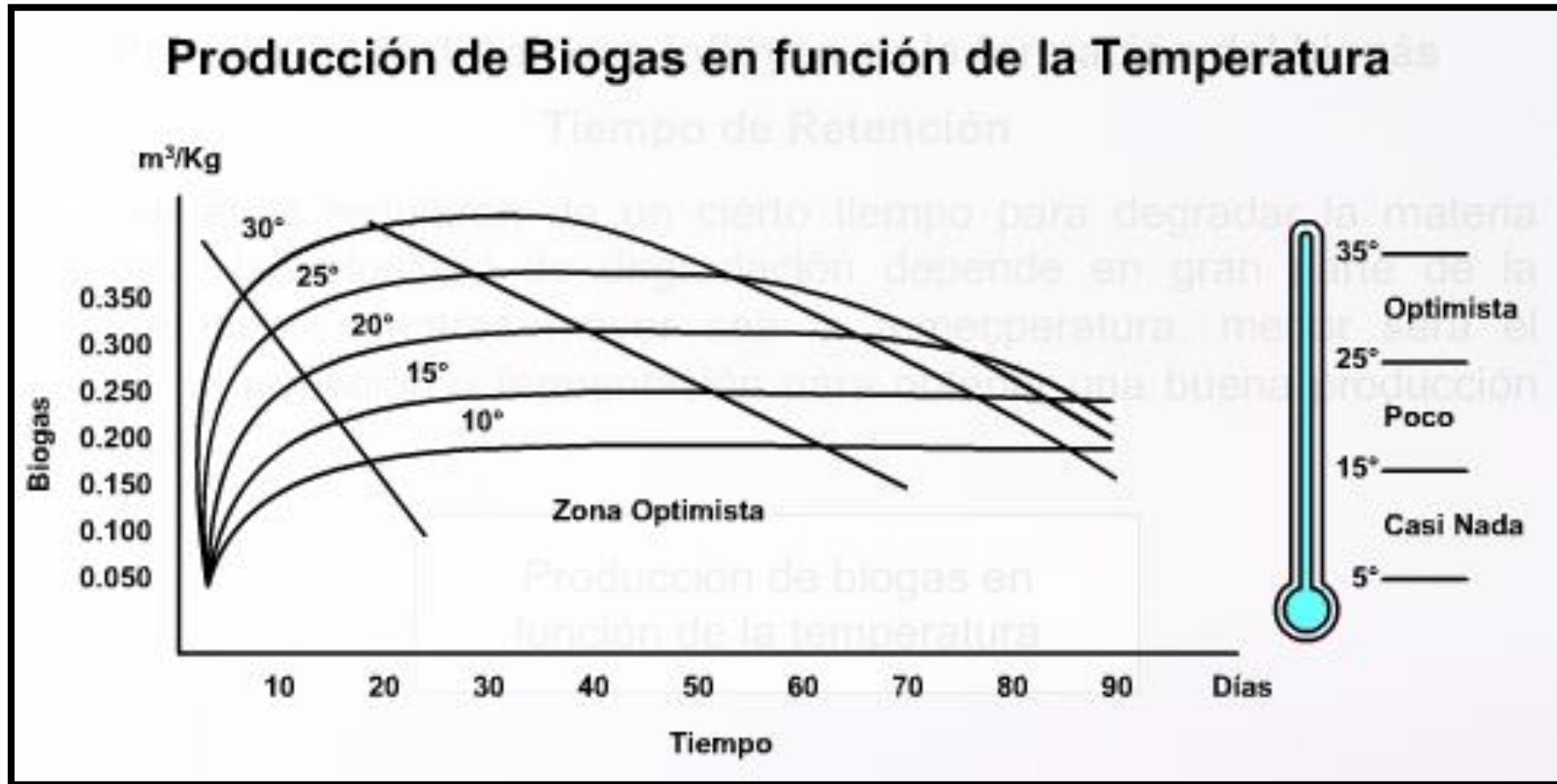


Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilos, mesófilos y termófilos. Fuente: Speece (1996)

Cuadro 2. Rangos de Temperatura y Tiempo de fermentación Anaeróbica

FERMENTACION	MINIMO	OPTIMO	MAXIMO	TIEMPO DE FERMENTACION
Psycrophilica	4-10 °C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesophilica	15-20 °C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Thermophilica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

Principales factores que influyen en la formación del biogás



Factores

TIEMPO DE RETENCIÓN

En un digestor que trabaja en régimen estacionario o “discontinuo”, el tiempo de retención es el que transcurre entre la carga del sistema y su descarga.

En un sistema de carga diaria (régimen continuo o semicontinuo), el tiempo de retención va a determinar el volumen diario de carga que será necesario para alimentar al digestor, ya que se tiene la siguiente relación:

$$\frac{\text{Volumen del digestor [m}^3 \text{]}}{\text{Tiempo de retención [días]}} = \text{Volumen de carga diaria } \left[\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right]$$

CONTENIDO DE SÓLIDOS TOTALES

Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales. El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con que se carga el digestor es un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se efectúe satisfactoriamente.

Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores continuos o semicontinuos no debe tener más de un 8% de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso. En zonas rurales, comúnmente se usa una concentración de 5-10%, lo que varía según las diferentes regiones y estaciones.

Para calcular el volumen de agua que se debe mezclar con la materia prima para dar la proporción adecuada de sólidos totales, es necesario conocer el porcentaje de sólidos totales de la materia prima fresca.

Cuadro 3. Datos promedios sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos.

Residuos animales

Bovinos

Porcinos

Aves

Caprinos

Ovejas

Conejos

Equinos

Excretas humanas

% Sólidos totales

13.4 – 56.2

15.0 – 49.0

26.0 – 92.0

83.0 – 92.0

32.0 – 45.0

34.7 – 90.8

19.0 – 42.9

17.0

Continuación	
Residuos vegetales	% Sólidos Totales
Hojas secas	50.0
Rastrojo maíz	77.0
Paja trigo	88.0 – 90.0
Paja arroz	88.8 – 92.6
Leguminosas (paja)	60.0 – 80.0
Tubérculos (hojas)	10.0 – 20.0
Hortalizas (hojas)	10.0 – 15.0
Aserrín	74.0 – 80.0

1. Cálculo de Sólidos Totales o concentración de materia prima única de fermentación.

$$\% \text{ ST} = \frac{M_2}{M_1} * 100$$

ST = Concentración de sólidos totales (%)

M₁ = Peso fresco de la muestra (g)

M₂ = Peso estable de la muestra a 65 °C (g)

Ejemplo 1. Se calientan 10g de estiércol de cerdo a 65 °C en estufa de secado y se obtuvo un peso estable de 1,8g.

$$\text{ST} = \frac{1,8}{10} * 100 = 18\%$$

2. Cálculo de la concentración de sólidos totales para una materia prima de fermentación compuesta.

$$\% \text{ STC} = \frac{\text{ST1} \cdot \text{M1} + \text{ST2} \cdot \text{M2} + \dots \text{STn} \cdot \text{Mn}}{\text{ST1} + \text{ST2} + \dots \text{STn}} \cdot 100$$

STC = Concentración de sólidos totales en una materia prima compuesta (%)

M_n = Masa de la materia prima (kg)

ST_n = Concentración de sólidos totales para cada materia prima (%).

Ejemplo. Se dispone de las siguientes materias primas.

Materia prima	Peso materia prima (kg)	Sólidos totales) (%)
Residuos humanos	$M_1 = 100$	20
Estiércol de cerdo	$M_2 = 100$	20
Paja de arroz	$M_3 = 98,9$	90

$$STC = \frac{(100 \cdot 0,2) + (100 \cdot 0,2) + (98,9 \cdot 0,9)}{298,9} = \frac{129,01}{298,9} \cdot 100 = 43,16 \%$$

La concentración de sólidos totales en la muestra compuesta es de 43,2% y el agua presente en la muestra compuesta es de 56,8%.

Ejemplo dilución de cargas:

Se dispone de estiércol de bovino fresco, suponiendo que tiene un 20% de sólidos totales y se quiere diluir esta carga a un 5% de sólidos totales, para saber cuanta agua se debe agregar por kilo de excretas frescas, se realiza el siguiente cálculo:

$$\%ST \text{ (carga diluída)} = \frac{1 \text{ kg excreta} * \%ST \text{ excreta fresca}}{1 \text{ kg excreta fresca} + \text{agua agregada}}$$

$$0.05 = \frac{1 * 0.20}{1 + W \text{ agua}}$$

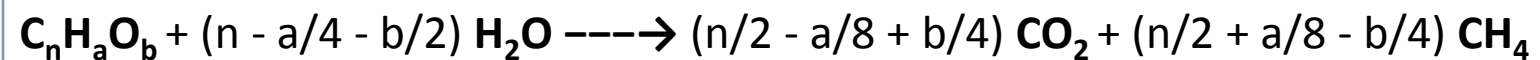
$$0.05 + 0.05W \text{ agua} = 0.20$$

$$W \text{ agua} = \frac{0.15}{0.05} = 3 \text{ litros/ kg excreta fresca}$$

RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO

Los microorganismos utilizan C como fuente de E y N como precursor en la síntesis de proteínas. Estos nutrientes son aportados por las materias primas a fermentar. El rango óptimo de la relación C/N en el material es de 25 a 30. Si la relación C/N es elevada, disminuye la actividad microbiológica y se produce inmovilización de N. Una relación C/N baja produce pérdidas de N en forma de NH_3 .

Relación C/N		Efecto
Bajo	< 10	Acumulación NH_3 , inhibición digestión
Óptimo	25–30	Formación ácido acético y ácidos grasos
Alto	> 30	Aumento formación ácidos grasos



Cálculo relación C/N de una muestra compuesta.

$$\text{C/N} = \frac{\text{C}_1 * \text{X}_1 + \text{C}_2 * \text{X}_2 + \dots + \text{C}_n * \text{X}_n}{\text{N}_1 * \text{X}_1 + \text{N}_2 * \text{X}_2 + \dots + \text{N}_n * \text{X}_n} * 100$$

C = % de carbono presente en la materia prima

N = % de nitrógeno presente en la materia prima

X = Peso de la materia prima

C/N= Relación C/N de la mezcla de materia prima.

EJEMPLO.

Se dispone de 100 kg de excretas humanas que tienen un 2,5% de C y 0,85% de N; 100kg de estiércol de cerdo con 7,8% de C y 0,6% de N. ¿Cuánta paja de arroz se necesitará para tener una mezcla con una relación C/N de 25/1, si la paja de arroz tiene 42% de C y 0,63% de N?

$$25/1 = \frac{0,025*100 + 0,078*100 + 0,42*X}{0,0085*100 + 0,006*100 + 0,0063*X}$$

X = 44,94 kg de paja de arroz.

Cuadro 4. Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.

	% C	% N	C/N
Residuos animales			
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Ovinos	35	1.00	35:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Caprinos	40	1.00	40:1
Conejos	35	1.50	23:1
Gallinas	35	1.50	23:1
Patos	38	0.80	47:1
pavos	35	0.70	50:1
Excretas humanas	2.5	0.85	3:1

Continuación

Residuos vegetales	%C	%N	C/N
Paja trigo	46	0.53	87:1
Paja cebada	58	0.64	90:1
Paja arroz	42	0.63	67:1
Paja avena	29	0.53	55:1
Rastrojos maíz	40	0.75	53:1
Leguminosas	38	1.50	28:1
Hortalizas	30	1.80	17:1
Tubérculos	30	1.50	20:1
Hojas secas	41	1.00	41:1
Aserrín	44	0.06	700:1

Factor pH

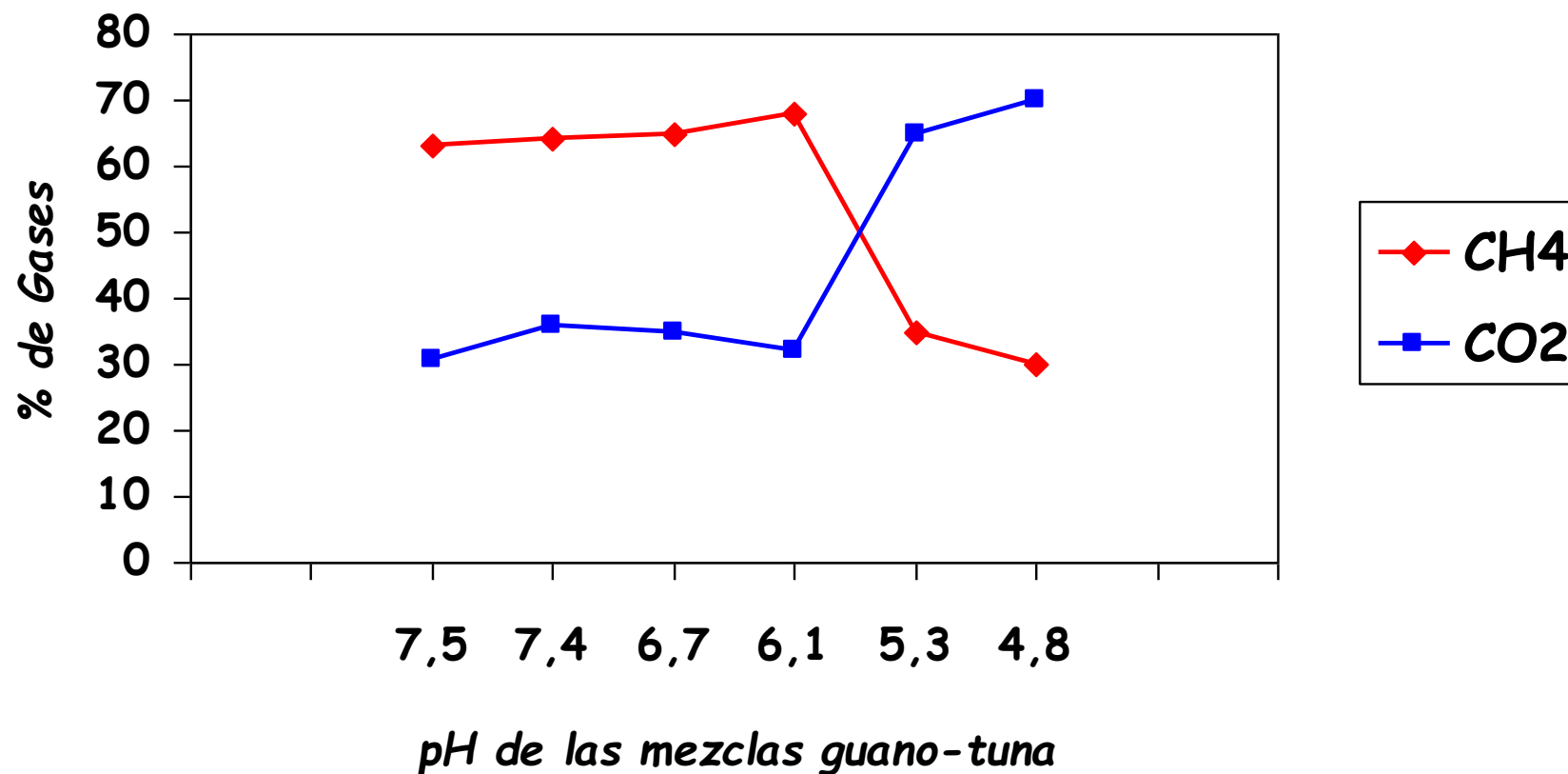
El valor óptimo de pH para la digestión metanogénica es de 6.5 a 7.5.

En un proceso normal de digestión en una planta rural pequeña, el equilibrio de pH se mantiene automáticamente y no necesita ajuste. Sin embargo, si la carga está compuesta de proporciones inconvenientes y se hace funcionar en malas condiciones, el valor de pH no se mantiene constante, tornándose demasiado ácido, con lo cual puede inhibirse el proceso de fermentación e incluso detenerse.

Las causas por las cuales puede descender el pH, entre otras, son:

- Aumento repentino de la carga.***
- Presencia de elementos tóxicos en la materia prima.***
- Cambio súbito de la temperatura.***

Composición del biogás en función del pH de las mezclas guano-tuna



Cuadro 5. Producción de biogás por tipo de residuo animal.

Estiércol	Disponibilidad Kg/día*	Relación C/N	Volumen de biogás	
			m³/kg húmedo	m³/día/animal
Bovino (500 kg)	10.00	25:1	0.04	0.400
Porcino (50 kg)	2.25	13:1	0.06	0.135
Aves (2 kg)	0.18	19:1	0.08	0.014
Ovino (32 kg)	1.50	35:1	0.05	0.075
Caprino (50 kg)	2.00	40:1	0.05	0.100
Equino (450 kg)	10.00	50:1	0.04	0.400
Conejo (3 kg)	0.35	13:1	0.06	0.021
Excretas humanas	0.40	3:1	0.06	0.025

Cuadro 6. Producción de biogás a partir de residuos vegetales.				
Residuos	Cantidad residuo Ton/ha	Relación C/N	Volumen de biogás	
			m³/Ton	m³/ha
Cereales (paja)				
Trigo	3.3	123:1	367	1200
Maíz	6.4	45:1	514	3300
Cebada	3.6	95:1	388	1400
Arroz	4.0	58:1	352	1400
Tubérculo (hojas)				
Papas	10.0	20:1	606	6000
Betarragas	12.0	23:1	501	6000
Leguminosas (paja)				
Porotos	3.2	38:1	518	1650
Habas	4.0	29:1	608	1400

Circuito de biodigestores Batch con calefacción y gasómetros



***Medidor de gases
Dräger X-am7000***

PRINCIPALES CONTAMINANTES DEL BIOGÁS

CO₂: 30 – 45%

N₂: < 5%

O₂: 100 ppm - 2 %

H₂S: 50 – 3000 ppm

NH₃: 3-4 ppm

H₂O: saturada



Filtros comerciales



Filtros artesanales



**Filtro de 50 [cm] abierto con muestrario
de virutillas**



**Efecto oxidante del H_2S , sobre el
hierro o virutilla**

- ✓ Si bien pueden remover hasta el 100% del H_2S
- ✗ Altos costos de catalizador (Corta vida útil)
- ✗ Altas T°
No es sustentable su escalamiento y contaminan
- ✗ Altas presiones de trabajo

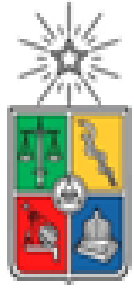
Fisicoquímicos

- Absorción por soluciones acuosas
- Adsorción por sólidos
- Depuración por solventes
- Chillers (enfriamiento)
- Filtración por membranas

Biológicos (Microbiológicos)

- Fototrofía
- Quimiotrofía

- ✗ Si bien existe menos tecnología desarrollada:
- ✓ Bajos costos (mínimo input de nutrientes)
- ✓ Temperaturas entre $20-30^\circ C$
- ✓ No contaminan
- ✓ Bajas presiones de trabajo



UNIVERSIDAD DE CHILE



Muchas gracias

*María Teresa Varnero Moreno
Profesora Asociada
Universidad de Chile*